

Figura 11 - Resultados de Corridas preliminares Caudal - Cota - Altura vs. tiempo
452

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
XII CONGRESO CHILENO



Sociedad Chilena
de Ingeniería Hidráulica



Instituto Nacional
de Hidráulica - Chile

14

**ESTUDIO DE LA RESISTENCIA AL
ESCURRIMIENTO EN RIOS DE MONTAÑA**

ALFONSO UGARTE S. (1)
RODOLFO MENDEZ J. (2)

RESUMEN

Se analiza el comportamiento de una nueva fórmula para el cálculo de la resistencia al escurrimiento en ríos de montaña, con pendiente fuerte y lecho constituido por materiales de granulometría gruesa y extendida. Se trata de una teoría que postula la existencia de una zona, próxima al fondo del lecho, en la cual no sería válido el perfil logarítmico de Prandtl - von Karman. Sobre la base de experiencias en ríos chilenos, ingleses y americanos, se ha analizado esta nueva ecuación y se entregan nuevos antecedentes que permiten revisar su validez y aplicabilidad.

1 Ingeniero Civil U. De Chile. Profesor Universidad Gabriela Mistral..

2 Ingeniero Civil (E). Universidad Técnica Federico Santa María.

1.- INTRODUCCION.

Los ríos de montaña se caracterizan por tener una pendiente fuerte y una granulometría gruesa y extendida. Por este motivo, se han deducido una serie de ecuaciones para la determinación de la resistencia al flujo en este tipo de cauces, muchas de las cuales están basadas en la fórmula de Darcy-Weisbach.

En este trabajo se presenta un estudio preliminar de la fórmula de Aguirre y Fuentes, la cual ha sido deducida aceptando una modificación al perfil de velocidad propuesto por Prandtl-von Karmán. En este caso se ha supuesto que el perfil logarítmico de velocidades sólo es válido hasta una determinada profundidad, a partir de la cual la velocidad del escurrimiento sería constante producto de la perturbación que produce la presencia de sedimentos granulares de gran tamaño en el fondo del cauce.

2.- RESEÑA HISTORICA

El factor de fricción «f», fue incorporado por Weisbach en el siglo pasado en la expresión para el cálculo de la resistencia friccional en tuberías, que en canales abiertos se usa de acuerdo con la siguiente expresión:

$$J = \frac{f * v^2}{8 * R * g} ; v = \sqrt{\frac{8}{f}} * (g * J * R)^{1/2} \quad (1)$$

En el año 1938 G.H.Keulegan, basado en la teoría de Prandtl-Von Karmán, desarrolló una ecuación para calcular el factor de fricción «f», en canales abiertos, la que considerando un perfil logarítmico de velocidades y flujo turbulento rugoso, tiene la siguiente expresión:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 6.25 + 5.75 \log\left(\frac{R}{k_s}\right) \quad (2)$$

En esta fórmula, el término $(8/f)^{1/2}$ se denomina coeficiente adimensional o generalizado de Chezy.

3.- FORMULAS EXISTENTES.

Para el caso de ríos de montaña, que se caracterizan por tener una pendiente fuerte y estar constituidos por un lecho de granulometría gruesa y extendida, se han propuesto una serie de fórmulas basadas en la ecuación de Keulegan, entre las que se puede citar las siguientes:

Hey 1979:

Dentro de las fórmulas existentes, una de las más importantes es la de Hey (1979), que propone la siguiente expresión:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 2.44 * \ln\left(\frac{a}{3.5} * \frac{R}{d_{84}}\right); \text{ con } a = 11.1 * \left(\frac{R}{H_{\max}}\right)^{-0.314} \quad (3)$$

Donde: H_{\max} : altura de aguas máximas en la sección.
 R/d_{84} : sumergencia relativa.

ii) Thompson y Campbell 1979:

Esta ecuación fue deducida sobre la base de mediciones hechas en un canal natural, de dimensiones 41 metros de ancho, 308 metros de largo y una pendiente de fondo de 0.052, que forma parte de las obras de la central de generación de energía hidroeléctrica Tekapo, ubicada en Nueva Zelanda.

La ecuación propuesta en el estudio es la siguiente:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 5.66 * \left(1 - \frac{0.1 * k_s}{R}\right) * \log\left(\frac{12 * R}{k_s}\right) \quad (4)$$

En el estudio se establece que k_s puede ser reemplazado por $4.5 * D$, siendo D diámetro medio de la granulometría del lecho. Haciendo el mismo análisis para determinar k_s en función de D , se obtiene que k_s presentado en términos de d_{84} . El resultado es $k_s = 2.31 d_{84}$.

iii) Ugarte y Mendez 1994:

Sobre la base de un conjunto de experiencias publicadas en la literatura técnica, fundamentalmente los trabajos de Jarrett (1984) con mediciones en ríos norteamericanos, Bathurst (1985) con mediciones hechas en ríos ingleses y Madrid (1992) con datos de ríos chilenos, se formó una base integrada de 168 datos, que permitió deducir una ecuación para la estimación de la resistencia en ríos de pendiente fuerte. Estos datos experimentales presentan valores de la sumergencia relativa en el rango $0.45 < R/d_{84} < 16.5$, de J entre 0.2% y 4.0% y números de Froude entre 0.22 y 1.17.

La estructura de la ecuación propuesta es la siguiente :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = 2,35 * \ln\left(\frac{R}{\alpha d_{84}}\right) + 3,94 ; r^2 = 0.65 \quad (5)$$

4.- ANALISIS DE LA TEORIA DE LA ESTELA

4.1.- ANTECEDENTES GENERALES.

Presentada en 1990 (Aguirre y Fuentes, ref.1), esta teoría propone una modificación del perfil logarítmico de velocidades de von-Karmán, que tradicionalmente ha sido usado en la deducción de expresiones para el calculo del coeficiente generalizado de Chezy.

La modificación propuesta supone que el perfil logarítmico de velocidades sólo es valido hasta una determinada profundidad, a partir de la cual la velocidad del escurrimiento es constante, producto de la perturbación que produce la presencia de sedimentos granulares de gran tamaño en el fondo del cauce. De esta manera, el perfil de velocidades presenta dos zonas bien diferenciadas.

La primera zona tiene su limite inferior en el fondo del lecho y su limite superior a una cierta altura medida desde el fondo, en la que la velocidad del escurrimiento es constante, y su altura proporcional al diámetro característico del material del lecho. La proporcionalidad de la altura con el diámetro esta dada por un factor denominado coeficiente o factor de estela (Beta). El nombre se debe, a que en esta zona la velocidad sería constante debido a la estela originada por los elementos rugosos del fondo del lecho.

La segunda zona de velocidades, tiene como limite inferior el limite superior de la primera zona y limite superior la superficie del escurrimiento; el perfil de velocidades en esta segunda zona corresponde al tradicional perfil de velocidades del tipo logarítmico.

De acuerdo con indicado en los párrafos anteriores, se tiene que la ecuación presentada para estimar el coeficiente de Chezy adimensional modificado o $(8/f)^{1/2}$, es la siguiente:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{1}{K} * \ln\left(\frac{R}{\alpha * D_c}\right) + B - \frac{1}{K} + \frac{1}{K} * \frac{\beta * D_c}{R} \quad (6)$$

donde: beta: factor de proporcionalidad del diámetro del sedimento del fondo del lecho que representa la altura de la estela.

alfa: factor de textura relacionado con el standard de Nikuradse. $k_s = \alpha * D_c$

K : constante universal von-Karmán (0.407)

B : valor aditivo igual a 8,5.

4.2.- ANALISIS DE LA ECUACION.

La ecuación propuesta (6), consta de dos términos, el primero de ellos es el siguiente:

$$C_o^* = \sqrt{\frac{8}{f_o}} = \frac{1}{K} * \ln\left(\frac{R}{\alpha D_c}\right) + B - \frac{1}{K} \quad (7)$$

Este primer término tiene una estructura del tipo Keulegan y representa a un flujo sin efectos de ondas en el fondo con una escala de rugosidad baja. Se le denomina coeficiente generalizado o adimensional de Chezy.

El segundo término proveniente de considerar un perfil de velocidades constante en el fondo del cauce, es decir corresponde al término del efecto estela y que modifica al coeficiente adimensional de Chezy. Su expresión es la siguiente:

$$C' = \left(\sqrt{\frac{8}{f}}\right)' = \frac{1}{K} * \frac{\beta * D_c}{R} \quad (8)$$

En el gráfico No 1 se puede apreciar el comportamiento de los dos términos de la ecuación de Aguirre y Fuentes, a partir del cual es posible hacer las siguientes observaciones:

- Para valores altos de la sumergencia relativa, (R/D_c) , la ecuación (6) se aproxima o tiende a la ecuación (7). Esto significa que para una escala de rugosidad baja, (sumergencia relativa alta), el efecto del fondo del lecho no tiene gran relevancia sobre el comportamiento del coeficiente de Chezy modificado $(8/f)^{1/2}$.

- Se aprecia que para valores pequeños de la sumergencia relativa, en la ecuación (6), es mas importante el término que representa al efecto de la «Teoría de la Estela», dado por la ecuación (8). Es decir que para escurrimientos macro rugosos el aporte del término proveniente del perfil de velocidades logarítmico, no sería de mucha importancia.

4.3.- ESTIMACION DE LOS PARAMETROS ALFA Y BETA.

Con el propósito de analizar el comportamiento de la ecuación (6), se determinaron los parámetros alfa y beta, ya citados, para lo cual se utilizaron las mismas bases de datos citadas en el estudio de Ugarte y Mendez, es decir las mediciones correspondientes a las presentadas por Bathurst

(1985), Jarrett (1984) y Madrid (1992).

Para determinar los valores de alfa y beta se utilizó el método de mínimos cuadrados, tomando como D_e el 84%. Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro N°1, que se muestra a continuación:

Cuadro N° 1
Valores de Coeficientes
para Ecuación (6)

Base de Medición	alfa	beta
Bathurst (1985)	1.841	-0.301
Jarret (1984)	2.839	0.109
Madrid (1992)	4.043	1.595

Es posible apreciar que para el caso de la base de medición presentada por Bathurst (1985), el valor que adopta el parámetro beta, es negativo. Esto no tiene sentido físico, puesto que reflejaría que la altura de la estela se encontraría más abajo que el límite formado por el material rugoso. En la práctica esa situación indicaría que el fenómeno de la estela no se produciría.

Para evaluar el comportamiento de la ecuación (6) se calculó el factor modificado de Chezy, en función de la sumergencia relativa, para cada una de las tres bases, utilizando los valores de alfa y beta presentados en el Cuadro N_1. Esto se puede apreciar en los gráficos No 2, No 3 y No 4. Por otra parte, en el Cuadro N°2, se muestran los errores que se producen en la estimación de $(8/\Gamma)^{1/2}$, para cada una de las bases de mediciones utilizadas:

Cuadro N° 2
Resultados de la Aplicación
de la Ecuación (6)

Valores e%	Base Medición	Base Medición	Base Medición
	Bathurst	Jarret	Madrid
Promedio	22.53	23.72	13.56
D.Standard	20.56	20.48	10.17
Máximo	95.35	87.68	38.39
Mínimo	0.27	0.53	1.09

Conjuntamente con lo anterior, en los gráficos No 5, No 6 y No 7 se presenta las velocidades de escurrimiento medidas versus las estimadas con la ecuación (6), para cada una de las bases de datos consideradas.

5.- CONCLUSIONES.

En forma preliminar, de acuerdo a lo expuesto anteriormente, se puede concluir lo siguiente:

a. Es posible observar que para el caso de las bases de datos presentadas por Bathurst (1985) y Jarrett (1984), en los gráficos 2 y 3 respectivamente, los puntos siguen una tendencia que puede ser representada por una función logarítmica. En ambos casos el factor beta es negativo o muy pequeño, lo que podría significar que el término correspondiente al efecto estela no se presentaría.

b. En el caso del tercer gráfico, que corresponde a la base de datos presentada por Madrid (1992)), si se observa el efecto estela, es decir se observa la influencia de los dos términos de la ecuación (6). En ese gráfico se aprecia levemente una rama descendente que refleja la presencia de la estela, y luego a partir de $R/d84$ igual a beta, una rama ascendente, que representaría una zona donde aparece la influencia de un perfil logarítmico de velocidades.

c. El factor de Chezy calculado con la ecuación (6) presenta una gran variabilidad cuando se lo relaciona únicamente con la sumergencia relativa, presentando dispersiones similares a las obtenidas con ecuaciones que no consideran el efecto estela.

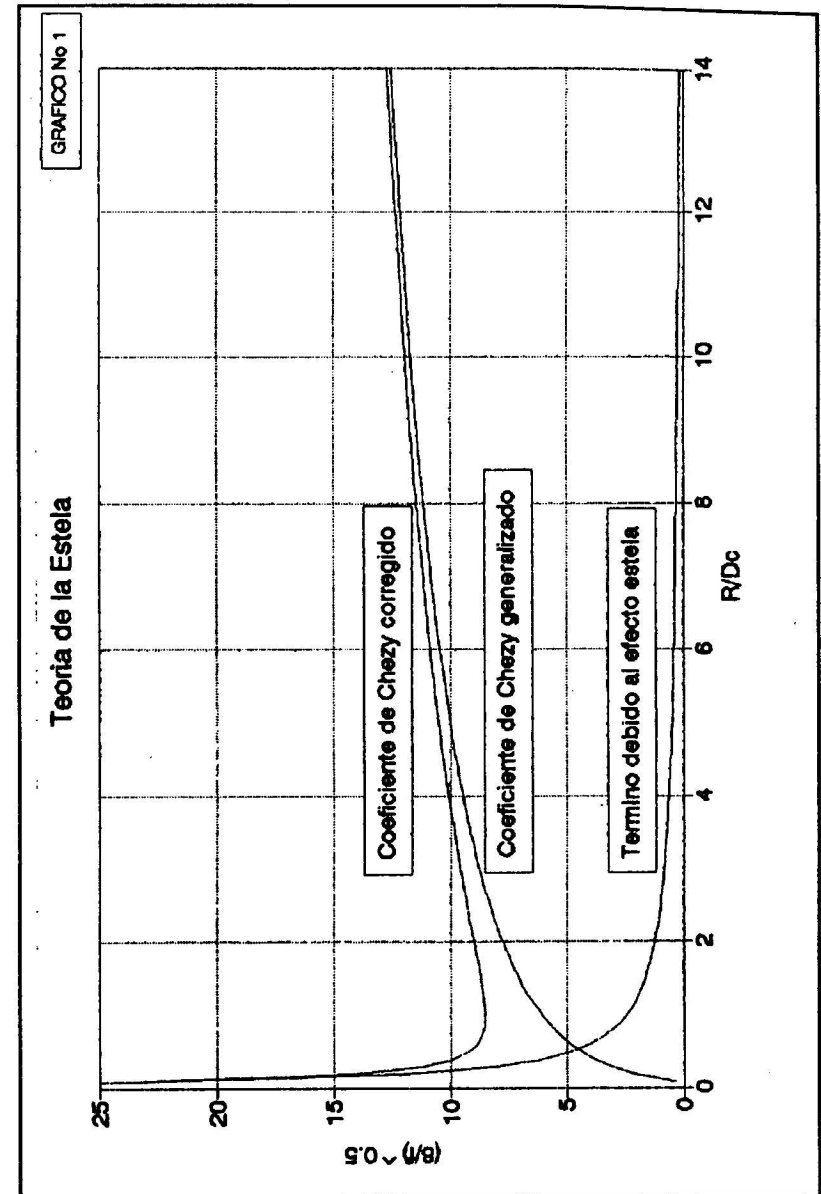
d. Sería importante analizar el comportamiento de la ecuación N_6 con el propósito de explicar las diferencias obtenidas en los valores de los parámetros alfa y beta. Podría ser interesante estudiar la posibilidad de que el factor beta no fuera constante y dependiera de otras variables tales como el número de Froude, la pendiente de la línea de energía J o de la sumergencia relativa.

6.- NOMENCLATURA.

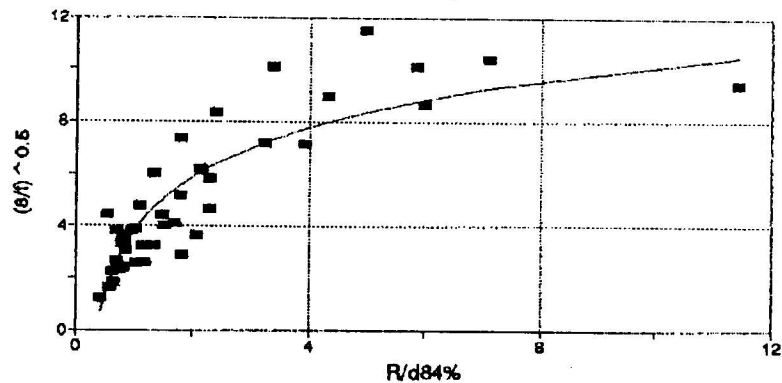
- C : Coeficiente de Chezy.
Dc : Diámetro característico del sedimento (m).
K_s : Aspereza granular de Nikuradse (m).
f : Factor de fricción de Darcy.
F_d : Número de Froude.
g : Aceleración de gravedad (m/s²).
J : Pendiente de la línea de energía.
k : Constante de von Karmán.
ln : Logaritmo natural.
R : Radio hidráulico (m).
v : Velocidad media (m/s).
r² : Coeficiente de correlación al cuadrado.

7.- BIBLIOGRAFIA.

- 1.) AGUIRRE PE, J, FUENTES, R. RESISTANCE TO FLOW IN STEEPROUGH STREAMS. Journal of Hydraulic Engineering A.S.C.E. 1990.
- 2.) BATHURST, J.C., FLOW RESISTANCE ESTIMATION IN MOUNTAIN RIVERS. Journal of Hydraulic Engineering A.S.C.E. 1985.
- 3.) HEY, R.D., FLOW RESISTANCE IN GRAVEL-BED RIVERS. Journal of Hydraulic Engineering A.S.C.E. 1979.
- 4.) JARRET R.D., HYDRAULICS OF HIGH GRADIENT STREAMS Journal of Hydraulic Engineering A.S.C.E. 1984.
- 5.) MADRID, M., HIDRAULICA DE RIOS CON GRAN PENDIENTE, U.T.F.S.M. 1992.
- 6.) MERY, H., USO DE ECUACIONES RACIONALES EN EL CALCULO DE LA PERDIDA FRICCIONAL EN CANALES REVESTIDOS III Coloquio Nacional de Hidráulica 1977.
- 7.) UGARTE, A. y MENDEZ, R. , FACTOR DE FRICCION EN RIOS DE MONTAÑA. III Jornadas de Hidráulica, «Francisco Javier Domínguez» 1994.



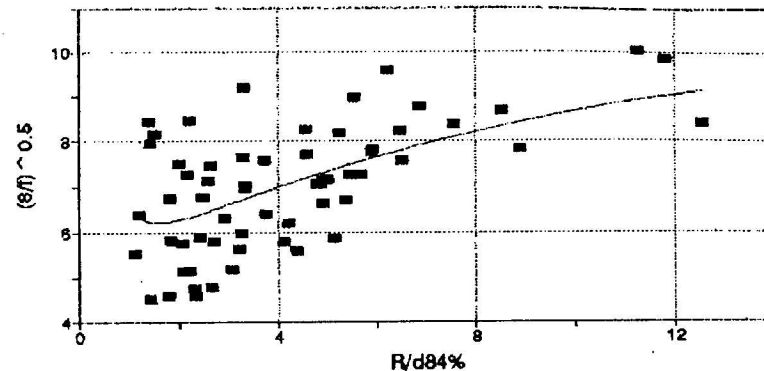
FACTOR DE FRICCION (Ecuacion No 6)
Ecuacion de Aguirre y Fuentes



■ Base datos Bathurst

GRAFICO No 2

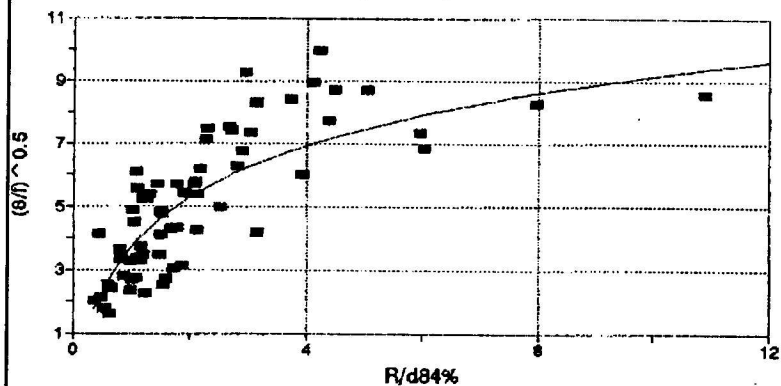
FACTOR DE FRICCION (Ecuacion No 6)
Formula de Aguirre y Fuentes



■ BASE DATOS MADRID

GRAFICO No 4

FACTOR DE FRICCION (Ecuacion No 6)
Formula de Aguirre y Fuentes



■ Base datos Jarrett

GRAFICO No 3

Estimacion de la Velocidad
Formula de Aguirre y Fuentes

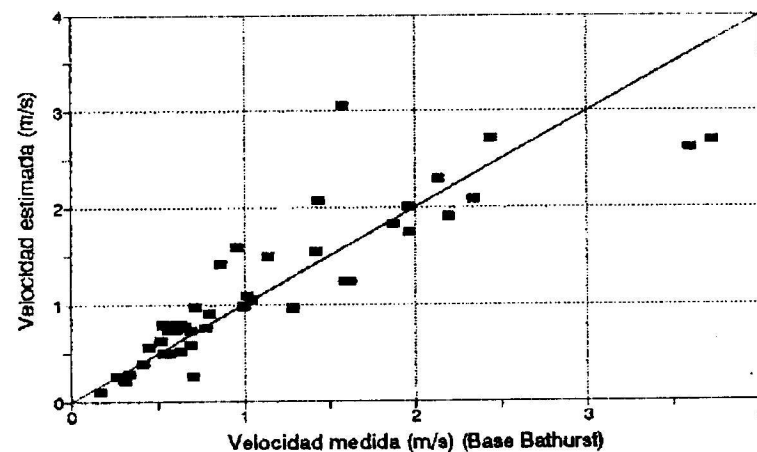
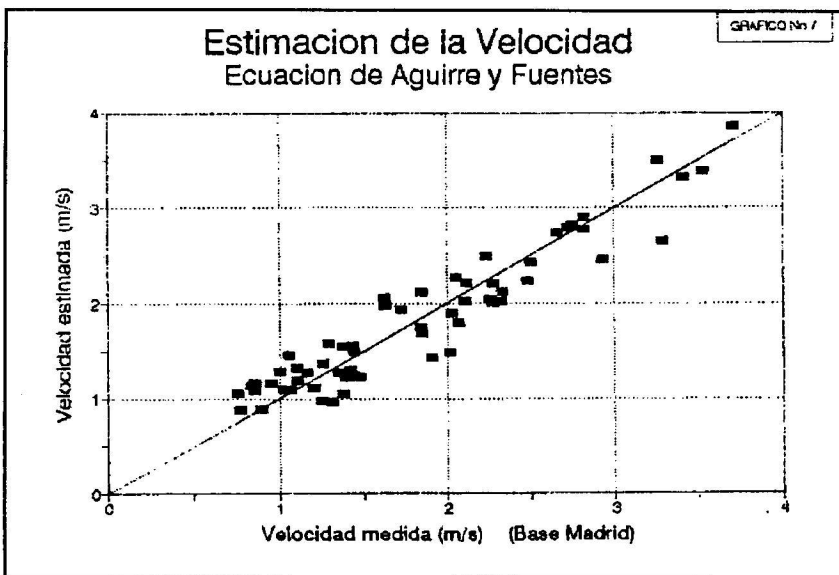
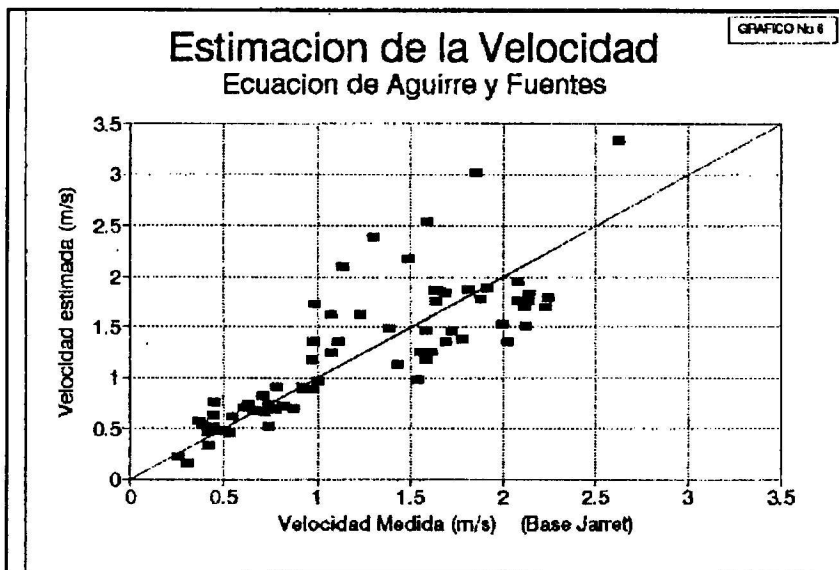


GRAFICO No 5



PARTE 4

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
XII CONGRESO CHILENO



1

ANALISIS Y SOLUCIONES PARA LAS ROTURAS DEL CUENCO AMORTIGUADOR DE LA PRESA ARROYITO

CARLOS M. ANGELACCIO (1) - RICARDO RIEDEL G. (2)
JORGE D. BACCHIEGA (3) - HECTOR D. BARRIONUEVO (3)
CLAUDIO FATTOR (3)

RESUMEN

Se plantean en el siguiente trabajo los reiterados problemas de roturas sufridos por el cuenco dissipador de energía del vertedero de la presa Arroyito, en Argentina. Se plantea la metodología utilizada para su diagnóstico, las conclusiones sobre las causas que las originaron y las soluciones de proyecto que se adoptaron. Se presenta asimismo la importancia de la interrelación entre la investigación en Laboratorio (desarrollada por el INCyTH en Argentina) y el desarrollo de la ingeniería (ejecutada por INGENDESA de Chile) para arribar a soluciones factibles de problemas concretos.

- (1) Ingeniero Civil, Jefe Programa Hidráulica de Obras, LHA-INCyTH, Argentina
- (2) Ing. Civil, Jefe de Proyectos, Área Proyectos Hidráulicos, INGENDESA, Chile
- (3) Ingenieros civiles, integrantes del equipo de Hidráulica de Obras, Laboratorio de Hidráulica Aplicada, INCyTH, Argentina